

**BECKHOFF**

## Neural Automation: Optimal Control durch Maschinelles Lernen

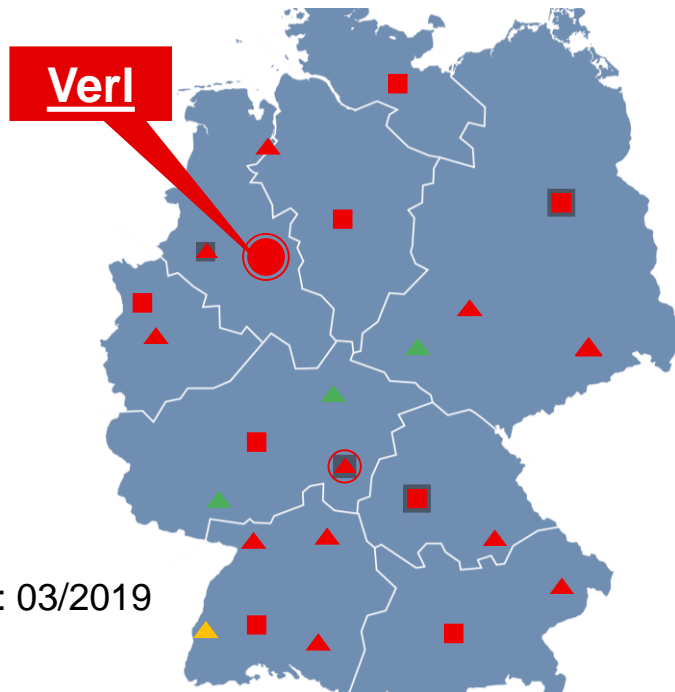
Dr. Fabian Bause  
Dr. Klaus Neumann  
Dr. Benjamin Jurke



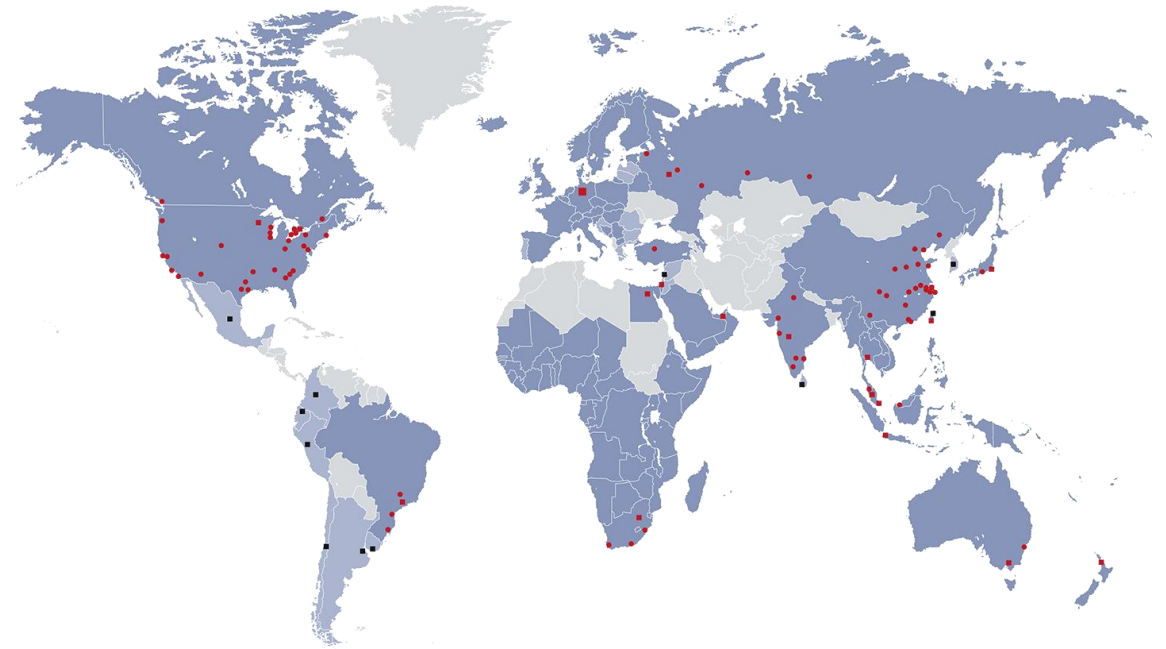
# Beckhoff Automation: Zahlen und Fakten

**BECKHOFF**

<b>Headquarters:</b>	Verl, Deutschland
<b>Mitarbeiter weltweit:</b>	4.300
<b>Anzahl Ingenieure:</b>	1.600
<b>Vertriebs-/technische Büros in Deutschland:</b>	22
<b>Beckhoff-Niederlassungen:</b>	38 Länder
<b>Tochterunternehmen und Distributoren:</b>	75 Länder
<b>Umsatz weltweit 2017:</b>	810 Mio. € (+19 %)
<b>Umsatz weltweit 2018:</b>	916 Mio. € (+13 %)



Stand: 03/2019



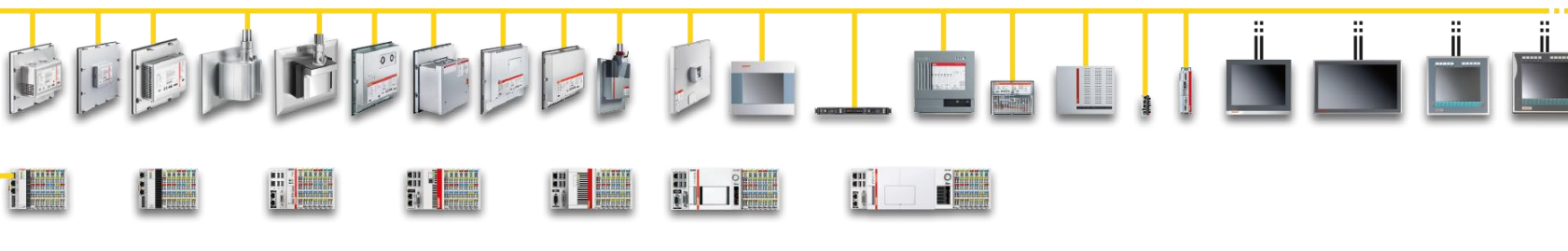
# Beckhoff Automation: Systemübersicht

BECKHOFF

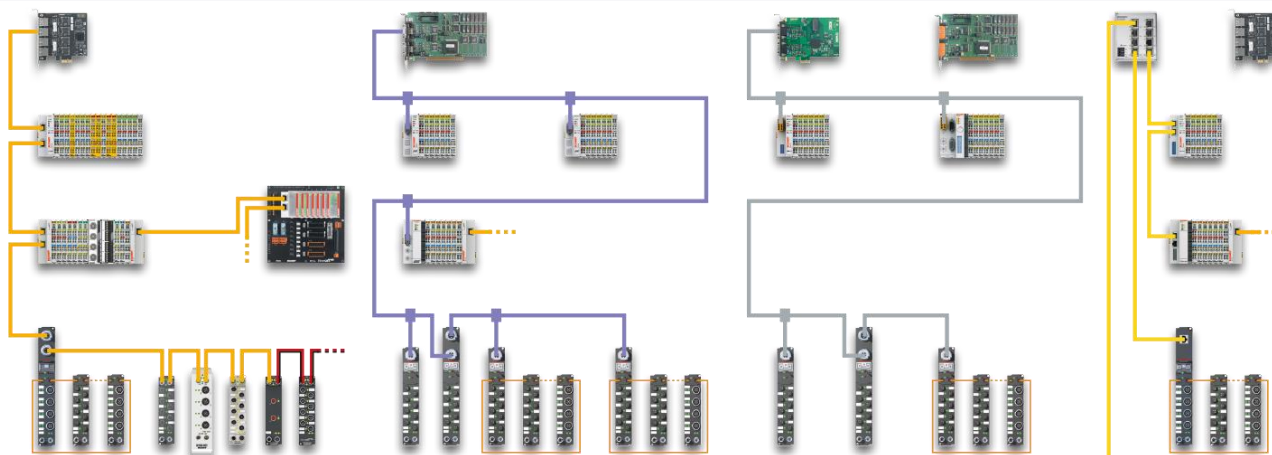
## Automation



## IPC



## I/O



EtherCAT

EtherCAT-P

PROFINET

CANopen

DeviceNet

Ethernet TCP/IP

Modbus

RS232  
RS485

LIGHTBUS



sercos  
the automation bus

EtherNet/IP



PROFINET

MP2&BUS

IO-Link



DALI

EIB/KNX

LON

DMX

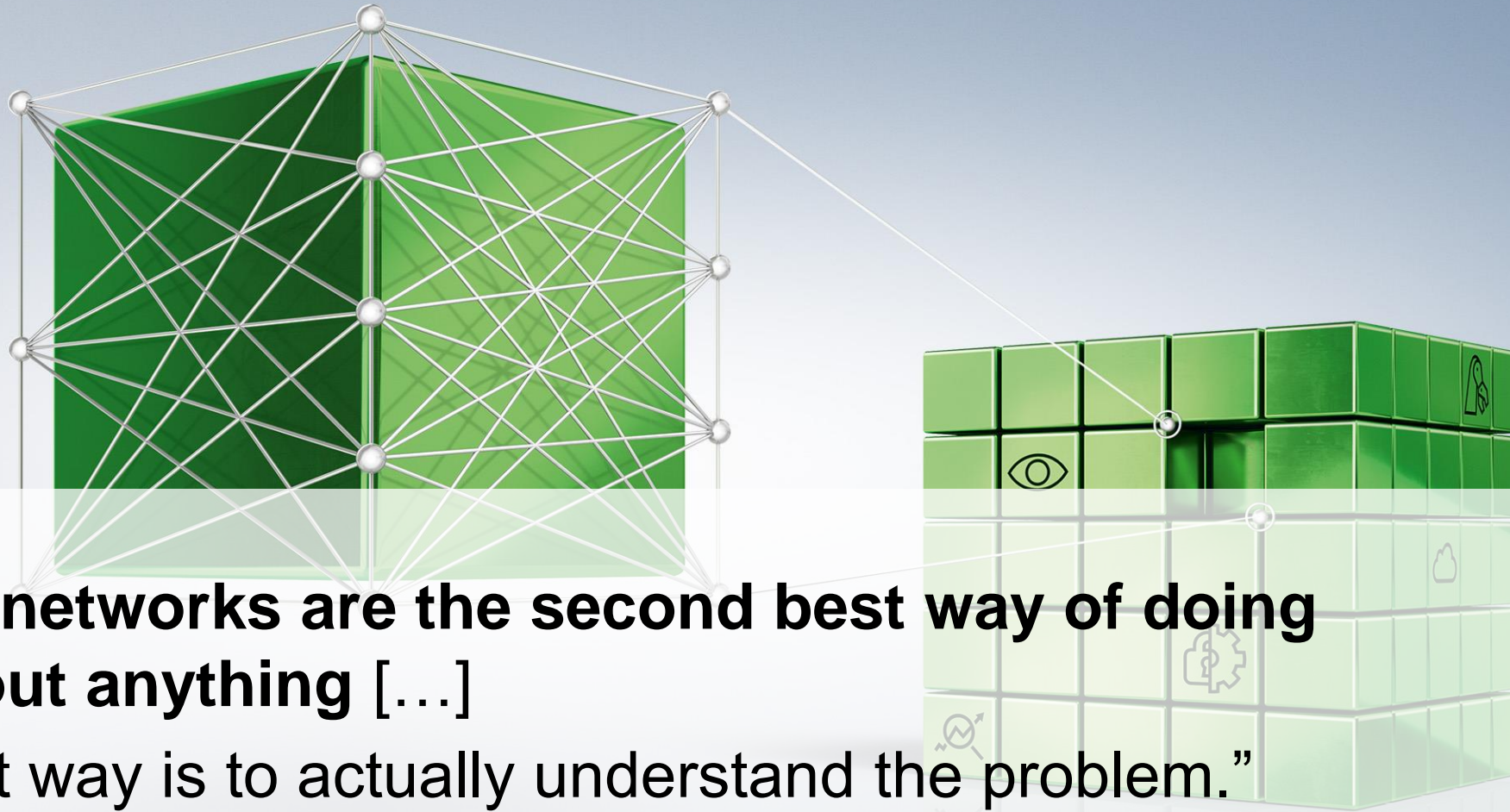
M-Bus

ControlNet

CC-Link

## Motion





**“Neural networks are the second best way of doing just about anything [...]**

**The best way is to actually understand the problem.”**

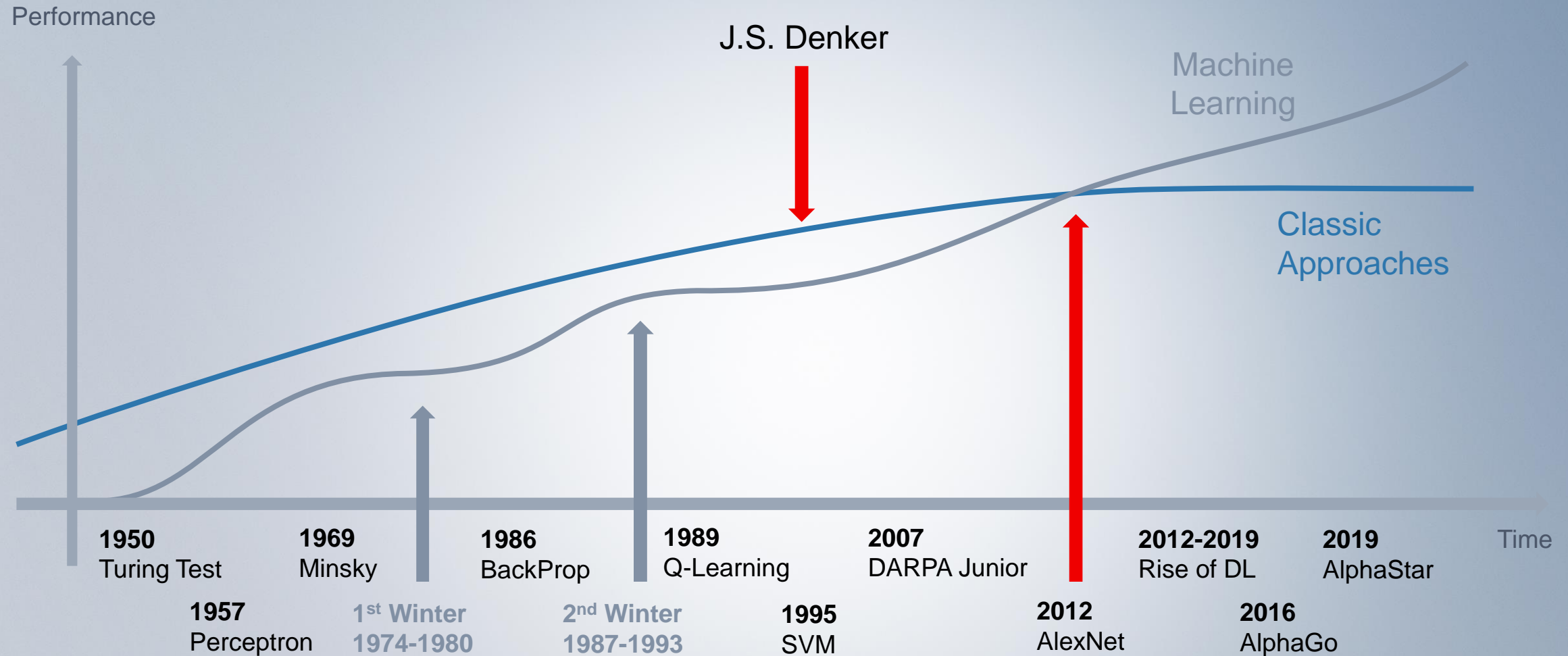
John S. Denker, around 1994



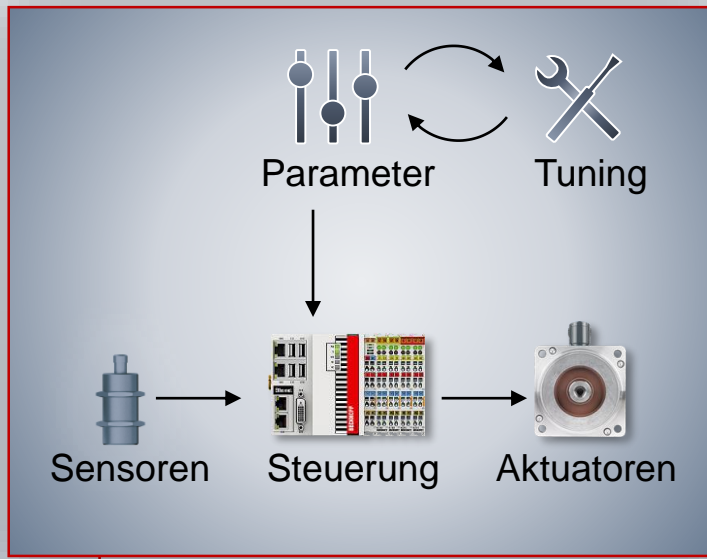
# Meilensteine des Maschinellen Lernens

## The best way of doing something...

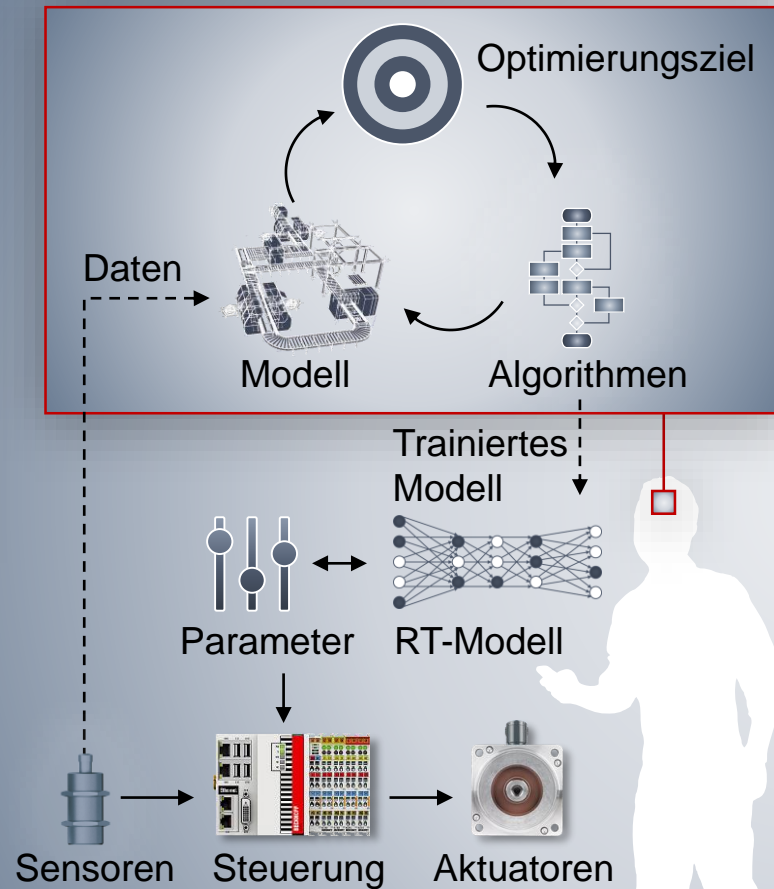
BECKHOFF



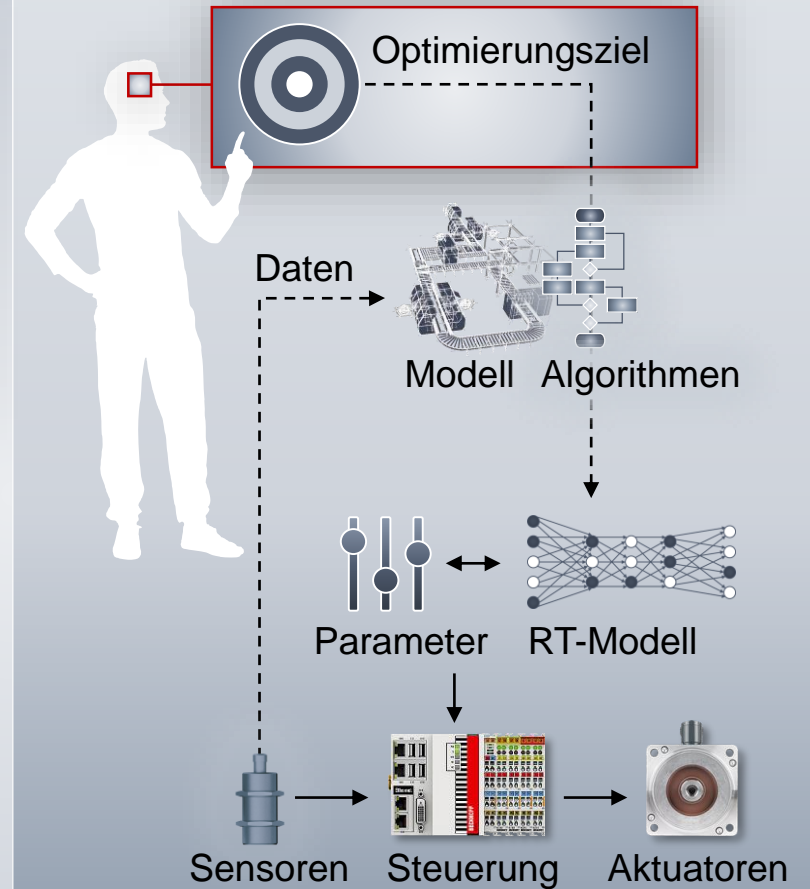
## Heute...



## Morgen...



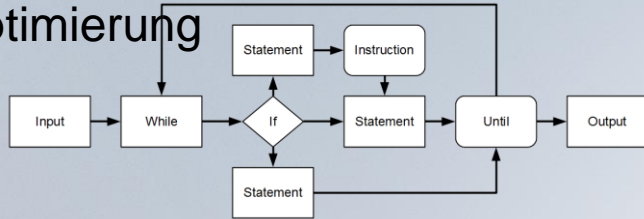
## Vision...



**“Computer languages of the future will be more concerned with goals and less with procedures specified by the programmer.”**

Marvin Minsky, 1969

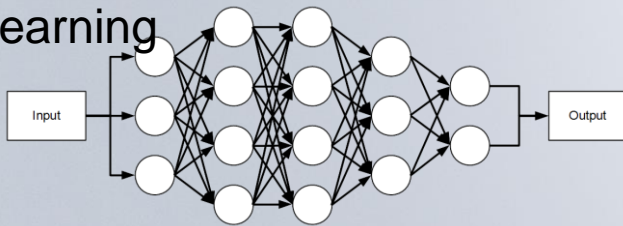
Nichtlineare  
Optimierung



Universal Approximation  
Theorem '89



Machine  
Learning



Engineering

Vorbereitung

Training

Run Time



Rechenlast



Rechen-Ressourcen

### Synchronisierungsaufgabe

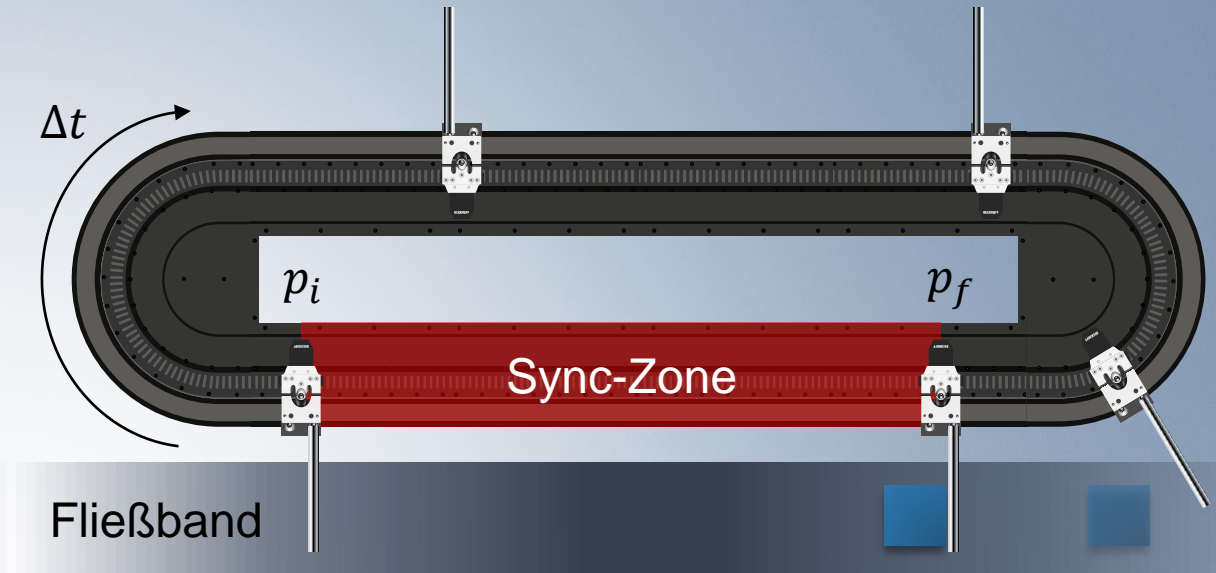
- Finde ein **optimiertes** Profil von  $p_i$  nach  $p_f$

### Randbedingungen

- Erreiche  $p_f$  in der Zeit  $\Delta t$
- Absync. mit definierter Dynamik  $(p_i, \dot{p}_i, \ddot{p}_i)$
- Aufsync. mit definierter Dynamik  $(p_f, \dot{p}_f, \ddot{p}_f)$
- $p(t)$  zweifach stetig differenzierbar in  $p_i$  und  $p_f$

### Nebenbedingungen

- Max. und min. Geschw., Beschl. und Ruck





### Synchronisierungsaufgabe

- Finde ein **optimiertes** Profil von  $p_i$  nach  $p_f$

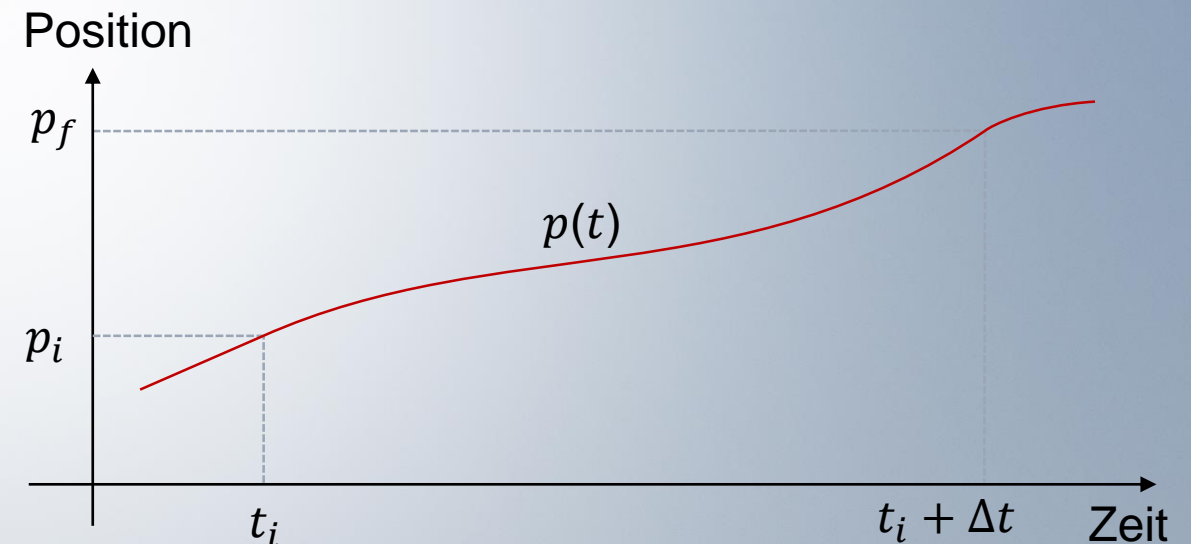
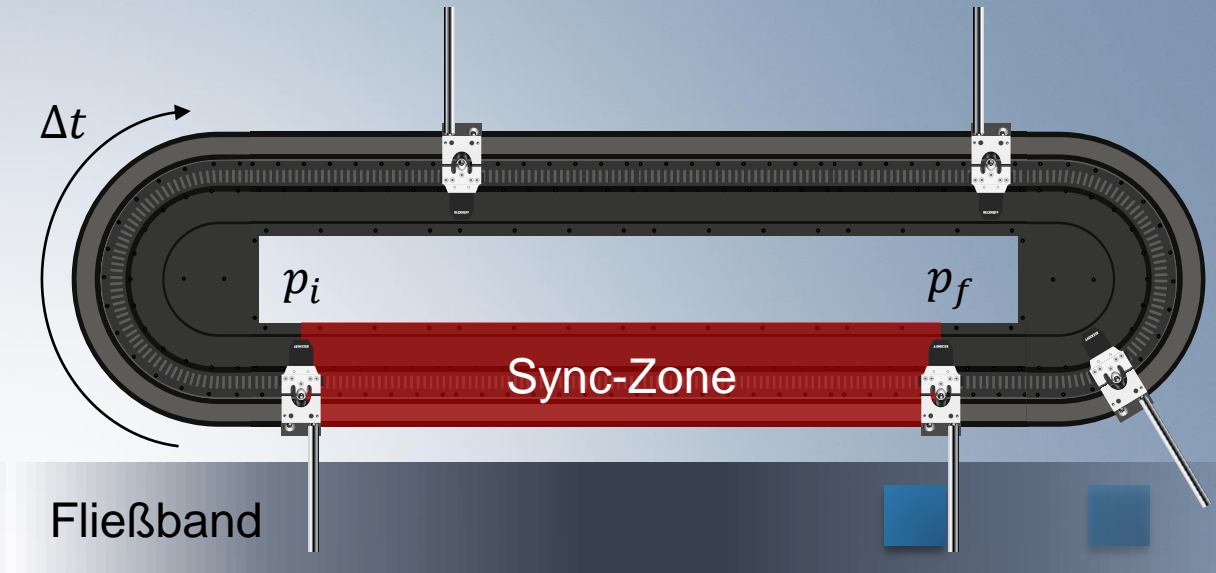
### Randbedingungen

- Erreiche  $p_f$  in der Zeit  $\Delta t$
- Absync. mit definierter Dynamik  $(p_i, \dot{p}_i, \ddot{p}_i)$
- Aufsync. mit definierter Dynamik  $(p_f, \dot{p}_f, \ddot{p}_f)$
- $p(t)$  zweifach stetig differenzierbar in  $p_i$  und  $p_f$

### Nebenbedingungen

- Max. und min. Geschw., Beschl. und Ruck

**Viele Profile möglich – Welches soll gewählt werden?**



### Synchronisierungsaufgabe

- Finde ein **optimiertes** Profil von  $p_i$  nach  $p_f$

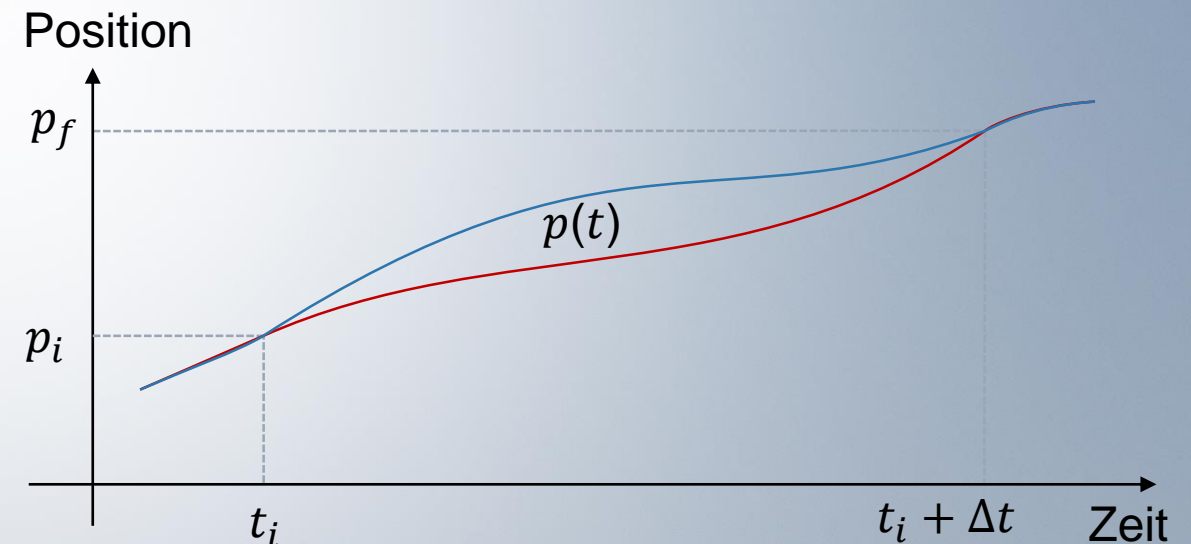
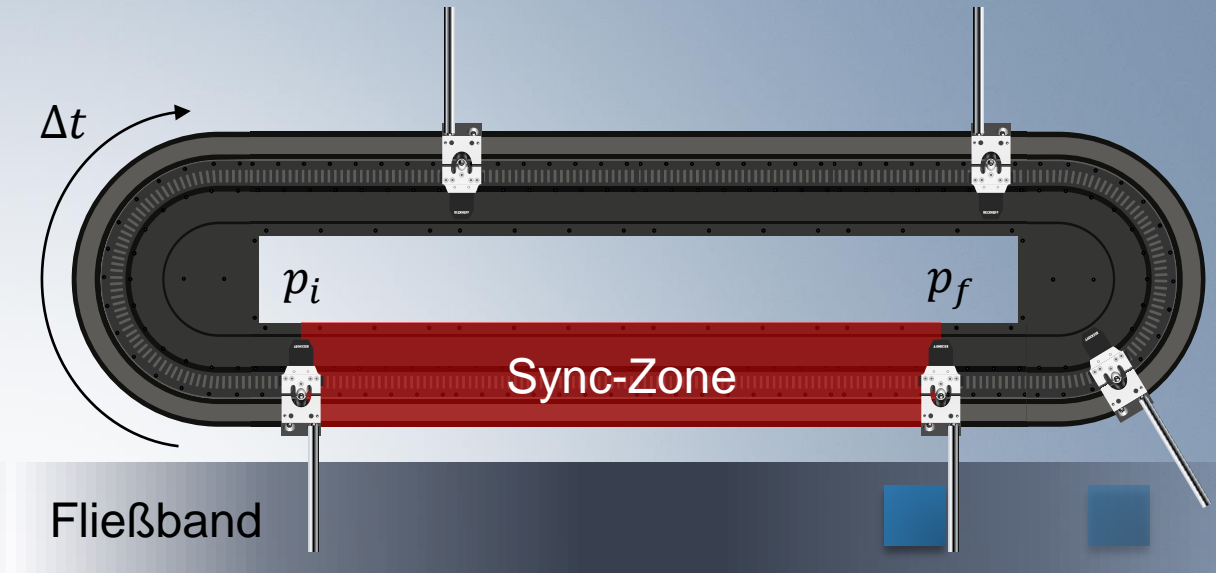
### Randbedingungen

- Erreiche  $p_f$  in der Zeit  $\Delta t$
- Absync. mit definierter Dynamik  $(p_i, \dot{p}_i, \ddot{p}_i)$
- Aufsync. mit definierter Dynamik  $(p_f, \dot{p}_f, \ddot{p}_f)$
- $p(t)$  zweifach stetig differenzierbar in  $p_i$  und  $p_f$

### Nebenbedingungen

- Max. und min. Geschw., Beschl. und Ruck

**Viele Profile möglich – Welches soll gewählt werden?**



### Synchronisierungsaufgabe

- Finde ein **optimiertes** Profil von  $p_i$  nach  $p_f$

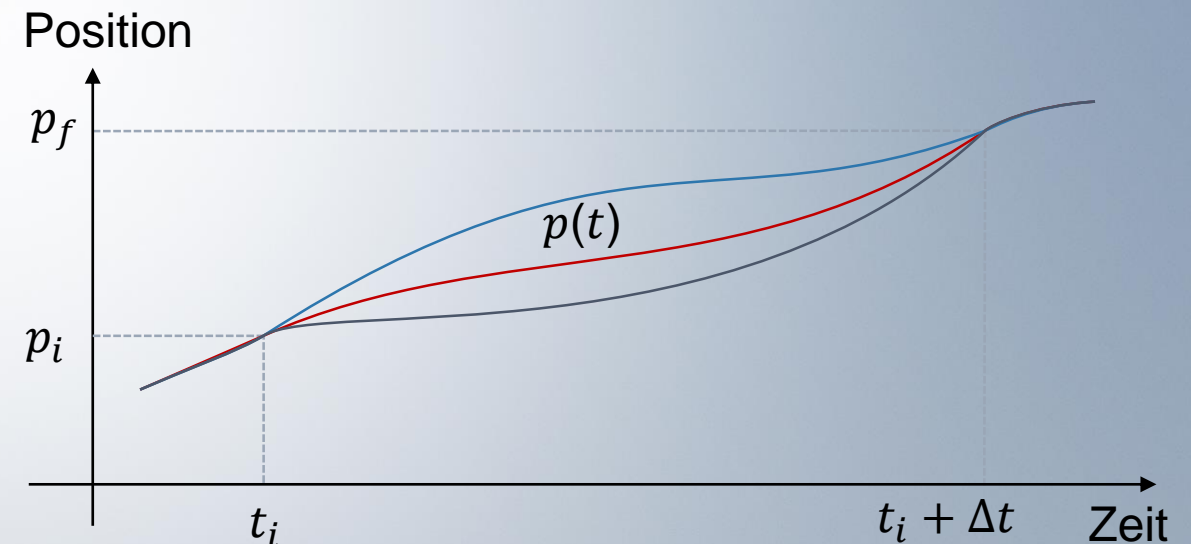
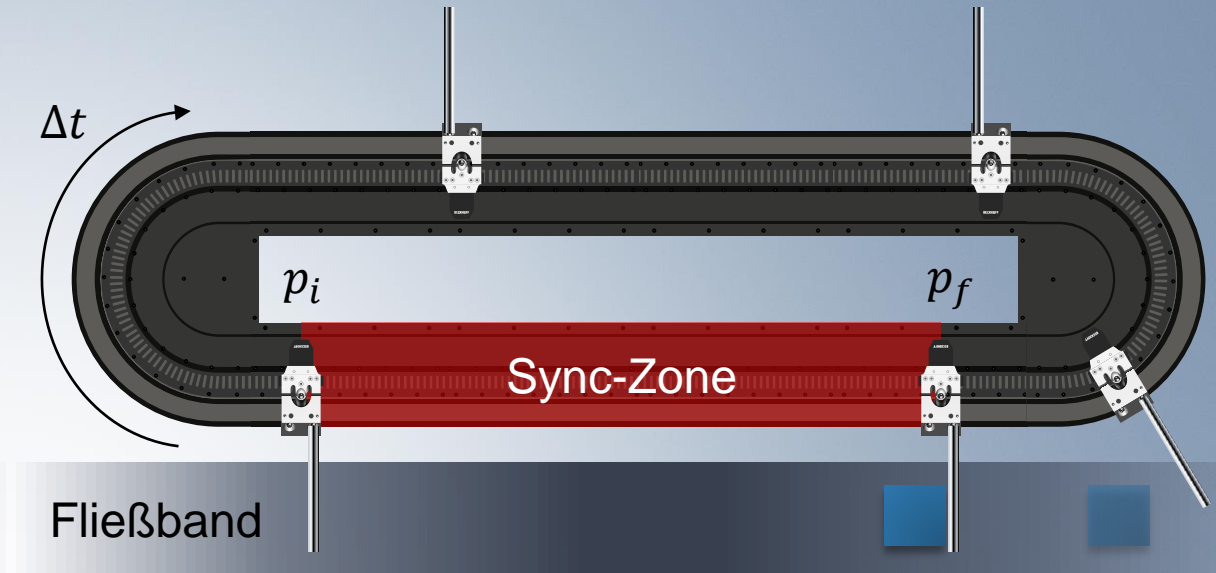
### Randbedingungen

- Erreiche  $p_f$  in der Zeit  $\Delta t$
- Absync. mit definierter Dynamik  $(p_i, \dot{p}_i, \ddot{p}_i)$
- Aufsync. mit definierter Dynamik  $(p_f, \dot{p}_f, \ddot{p}_f)$
- $p(t)$  zweifach stetig differenzierbar in  $p_i$  und  $p_f$

### Nebenbedingungen

- Max. und min. Geschw., Beschl. und Ruck

**Viele Profile möglich – Welches soll gewählt werden?**



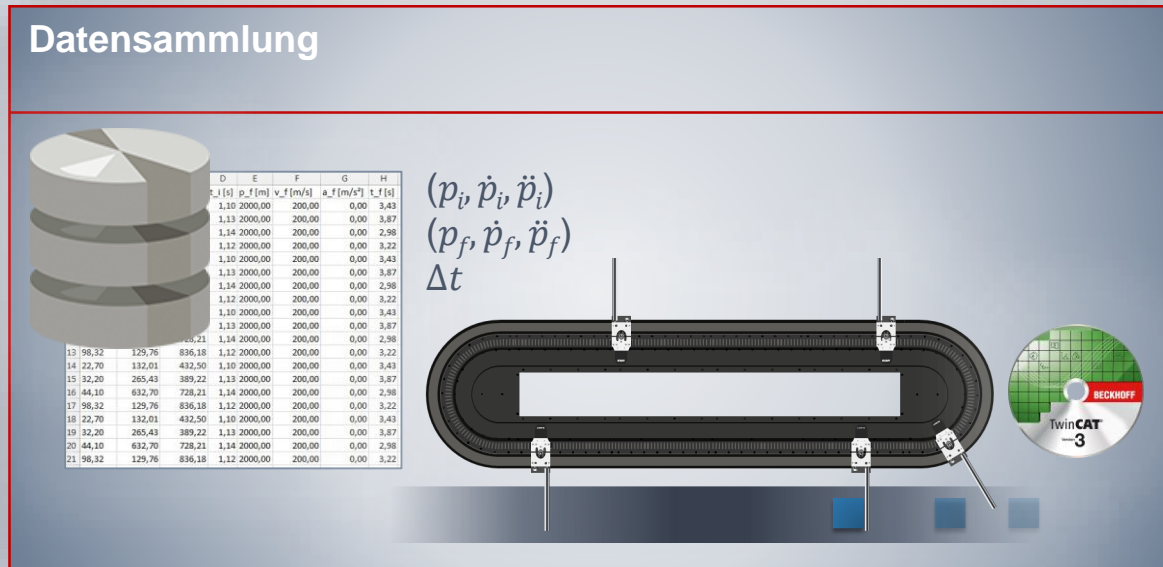
# Neuronales Motion-Profil

## How to...?

BECKHOFF

### Aufgabe 1

#### Sammlung der Anforderungen



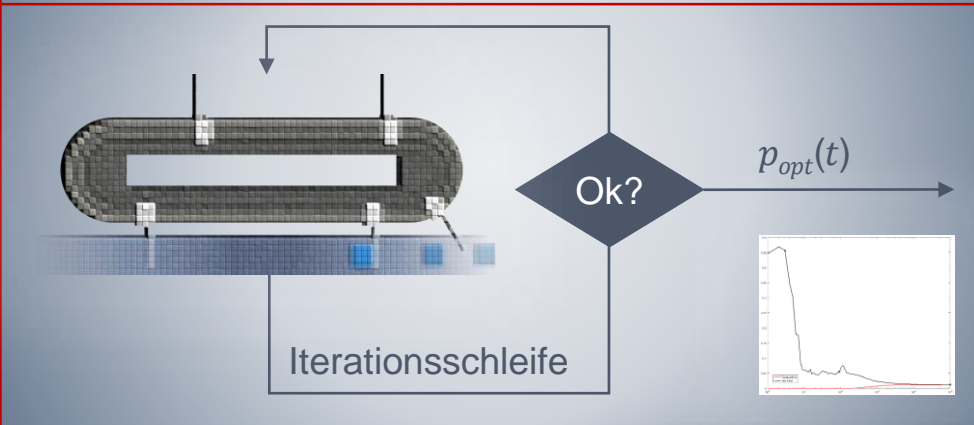


# Neuronales Motion-Profil


## How to...?

BECKHOFF

Adaptiere  $p(t)$  hinsichtlich eines Optimierungskriteriums

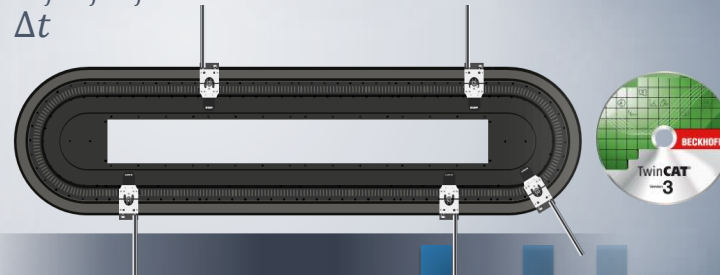


Datensammlung

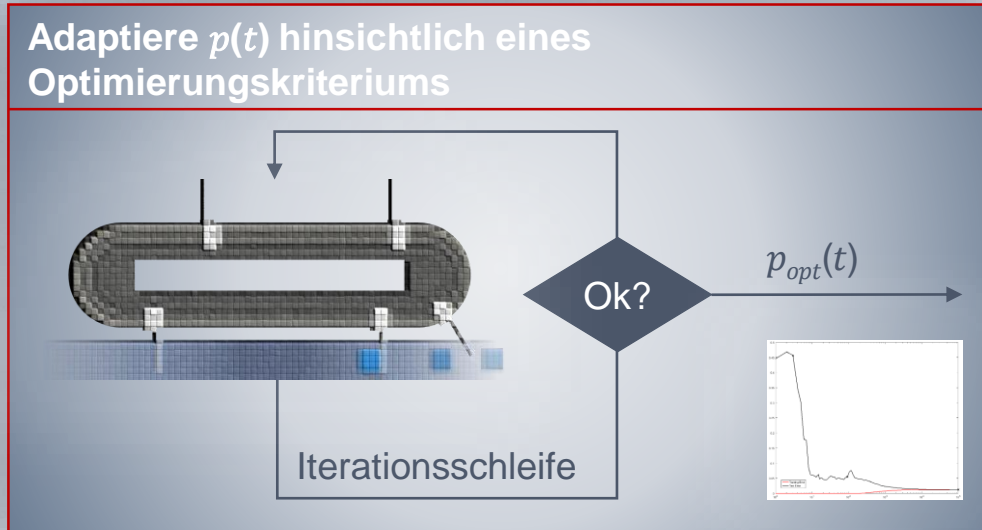


	D	E	F	G	H
$t_j [s]$	$p_f [m]$	$v_f [m/s]$	$a_f [m/s^2]$	$t_f [s]$	
13	98,32	129,76	836,18	1,12	2000,00
14	22,70	132,01	432,50	1,10	2000,00
15	32,20	265,43	389,22	1,13	2000,00
16	44,10	632,70	728,21	1,14	2000,00
17	98,32	129,76	836,18	1,12	2000,00
18	22,70	132,01	432,50	1,10	2000,00
19	32,20	265,43	389,22	1,13	2000,00
20	44,10	632,70	728,21	1,14	2000,00
21	98,32	129,76	836,18	1,12	2000,00

$(p_i, \dot{p}_i, \ddot{p}_i)$   
 $(p_f, \dot{p}_f, \ddot{p}_f)$   
 $\Delta t$



**Aufgabe 2**  
Erstelle Profile für  
den Trainingsprozess



### Verwendete MATLAB Toolboxes

Parallel Computing Toolbox  
Optimization Toolbox

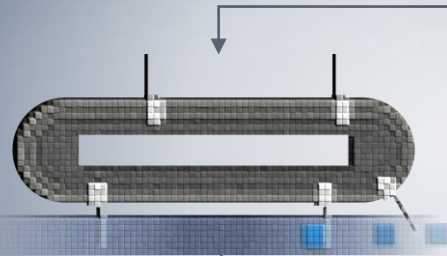
- SQP Optimierungsalgorithmus (fmincon)
- Optimierungsziel
  - Wenig Ruck
  - Wenig Beschleunigung
  - Wenig Geschwindigkeit
- Berechnung der Profile auf i7-4790K @ 4GHz
  - 20.000 Berechnungen => 6 h 58 min
  - **1,25 s** pro Berechnung im arith. Mittel

# Neuronales Motion-Profil

## How to...?

BECKHOFF

Adaptiere  $p(t)$  hinsichtlich eines Optimierungskriteriums



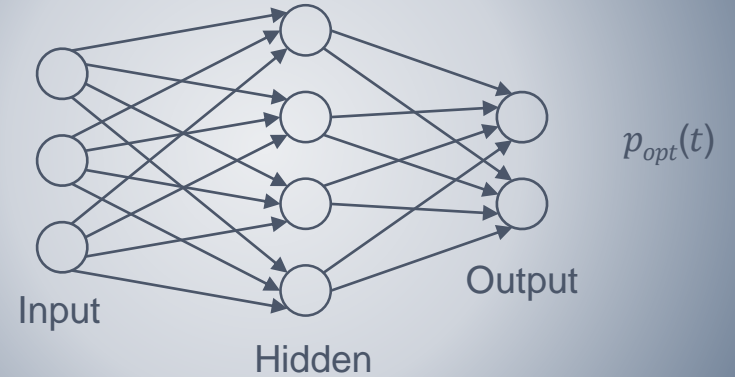
Iterationsschleife

Ok?

$p_{opt}(t)$

✓  $p_{opt}(t)$

Supervised Learning:  
Wissenstransfer in ein neuronales Netz

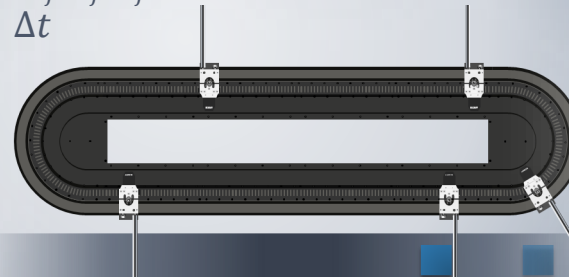


Datensammlung



	D	E	F	G	H
t <sub>j</sub> [s]	p <sub>i</sub> [m]	v <sub>i</sub> [m/s]	a <sub>i</sub> [m/s²]	t <sub>f</sub> [s]	
13 98,32	129,76	836,18	1,12 2000,00	200,00	0,00 3,43
14 22,70	132,01	432,50	1,10 2000,00	200,00	0,00 3,43
15 32,20	265,43	389,22	1,13 2000,00	200,00	0,00 3,87
16 44,10	632,70	728,21	1,14 2000,00	200,00	0,00 2,98
17 98,32	129,76	836,18	1,12 2000,00	200,00	0,00 3,22
18 22,70	132,01	432,50	1,10 2000,00	200,00	0,00 3,43
19 32,20	265,43	389,22	1,13 2000,00	200,00	0,00 3,87
20 44,10	632,70	728,21	1,14 2000,00	200,00	0,00 2,98
21 98,32	129,76	836,18	1,12 2000,00	200,00	0,00 3,22

$(p_i, \dot{p}_i, \ddot{p}_i)$   
 $(p_f, \dot{p}_f, \ddot{p}_f)$   
 $\Delta t$

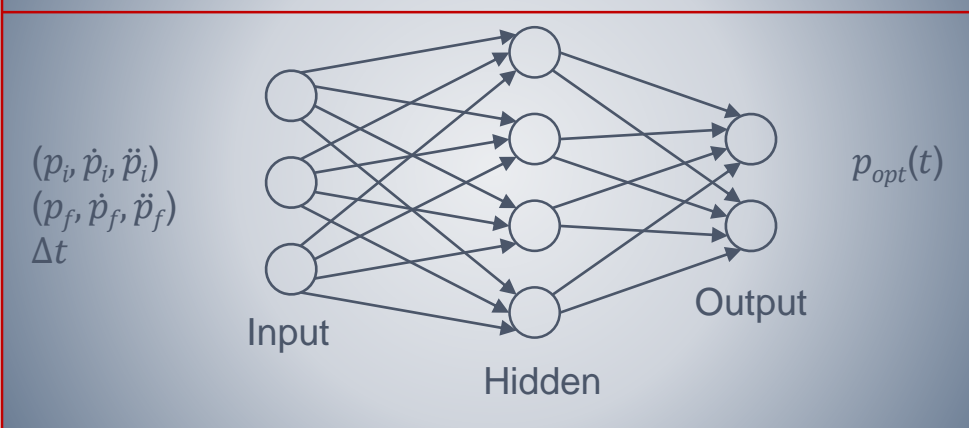


Task 3  
Supervised Learning

- Regressionsproblem
- Multi-Layer-Perceptron mit 250 Neuronen
- Supervised Learning
- **Trainingsdauer**
  - Bis zu 2 h auf CPU
  - 30 min auf GPU
- Inferenzdauer
  - 0,0394 s für 20.000 Berechnungen
  - Ca. **2 µs** pro Inferenz (deterministisch!)

### Supervised Learning:

Wissenstransfer in ein neuronales Netz



### Verwendete MATLAB Toolboxes

Parallel Computing Toolbox

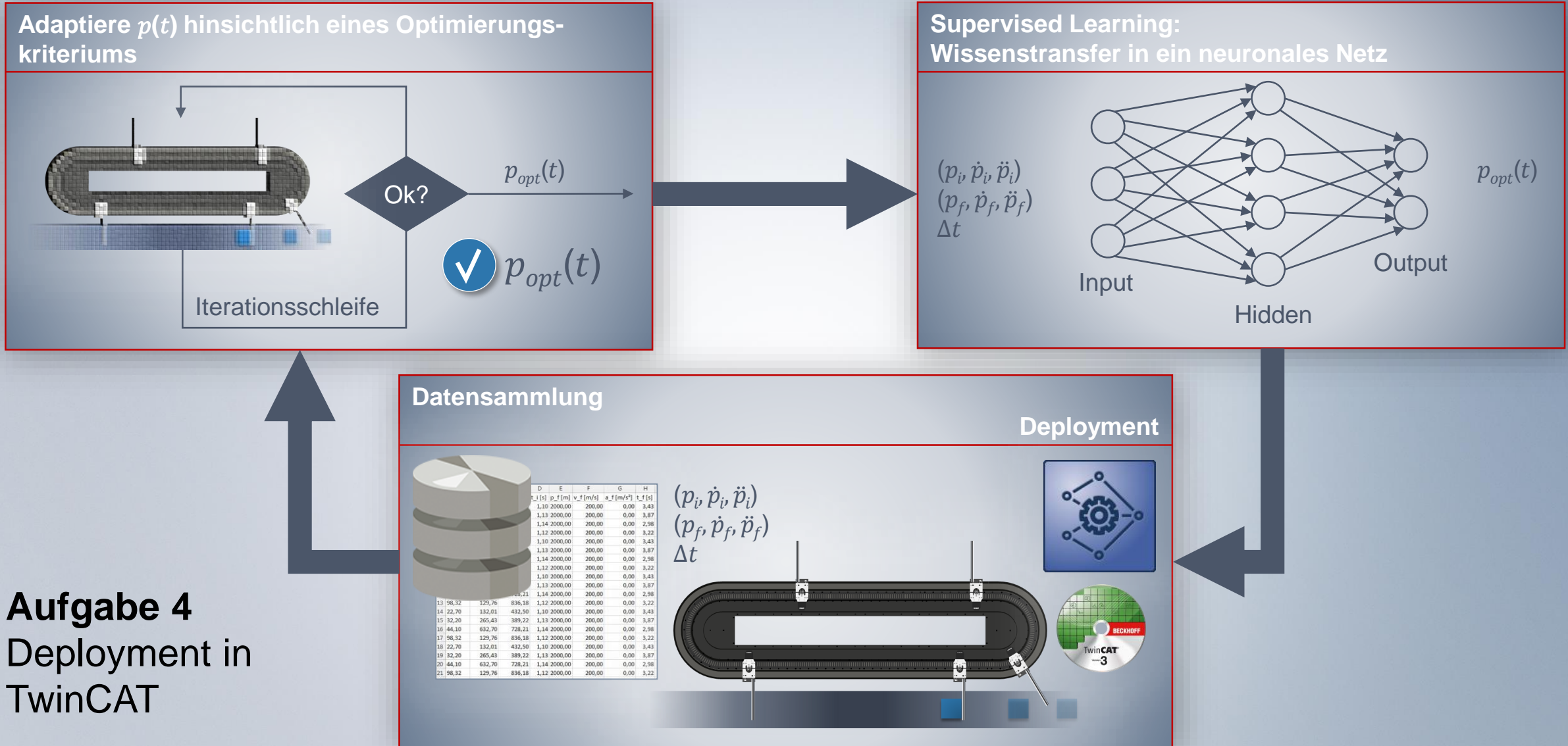
Deep Learning Toolbox



# Neuronales Motion-Profil

## How to...?

BECKHOFF




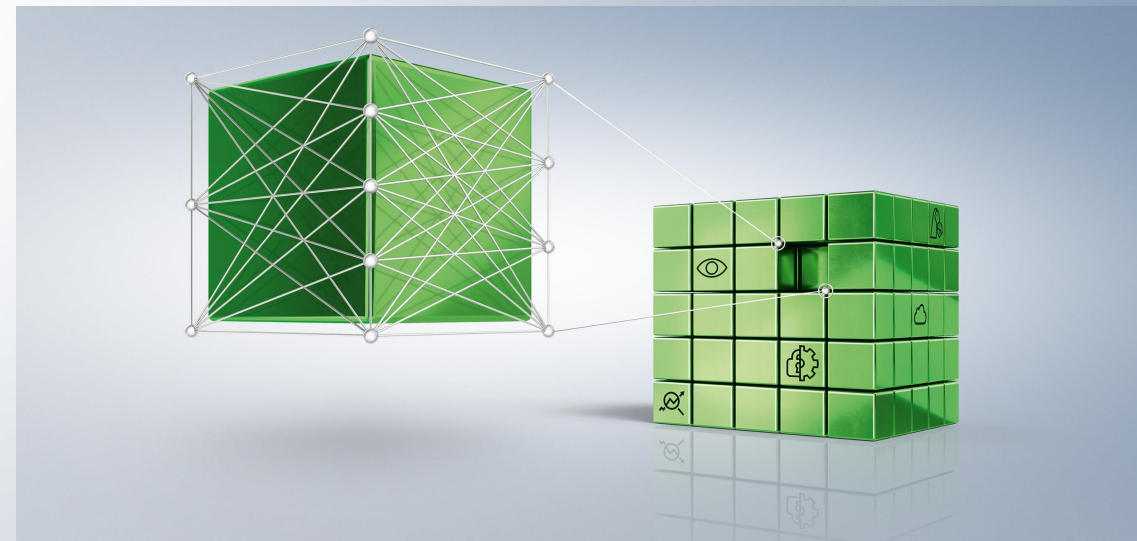
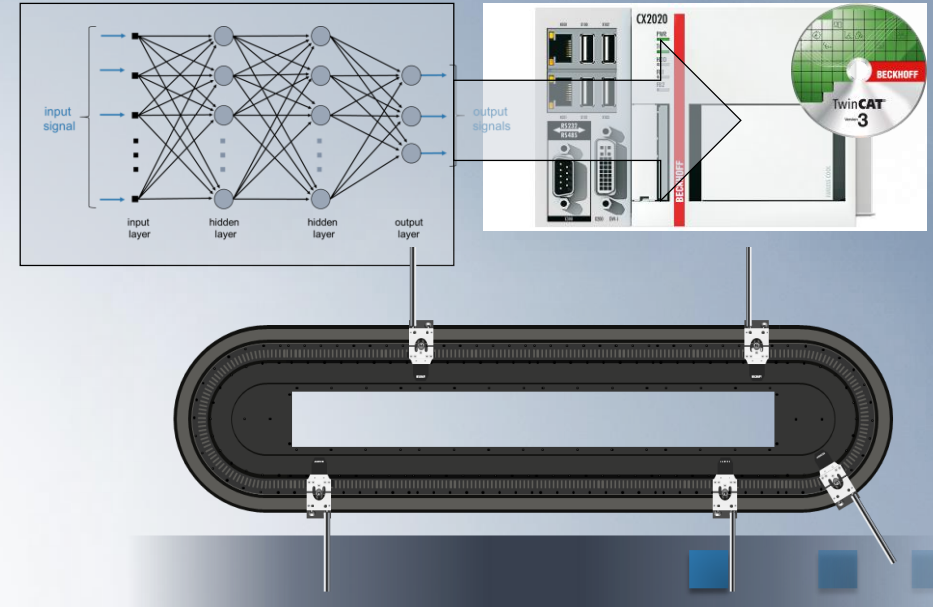
**Aufgabe 4**  
Deployment in  
TwinCAT

# Neuronales Motion-Profil

## How to...?

BECKHOFF

- Inferenz Neuronaler Netze in **Echtzeit**
- Mögliche Wege zum Deployment in TwinCAT
  - TC3 Neural Network Inference Engine
    - Via  ONNX oder XML Export
  - TC3 Target for MATLAB
    - Via [MATLAB Coder](#)
  - TC3 Target for MATLAB/Simulink
    - Via [Simulink Coder](#)

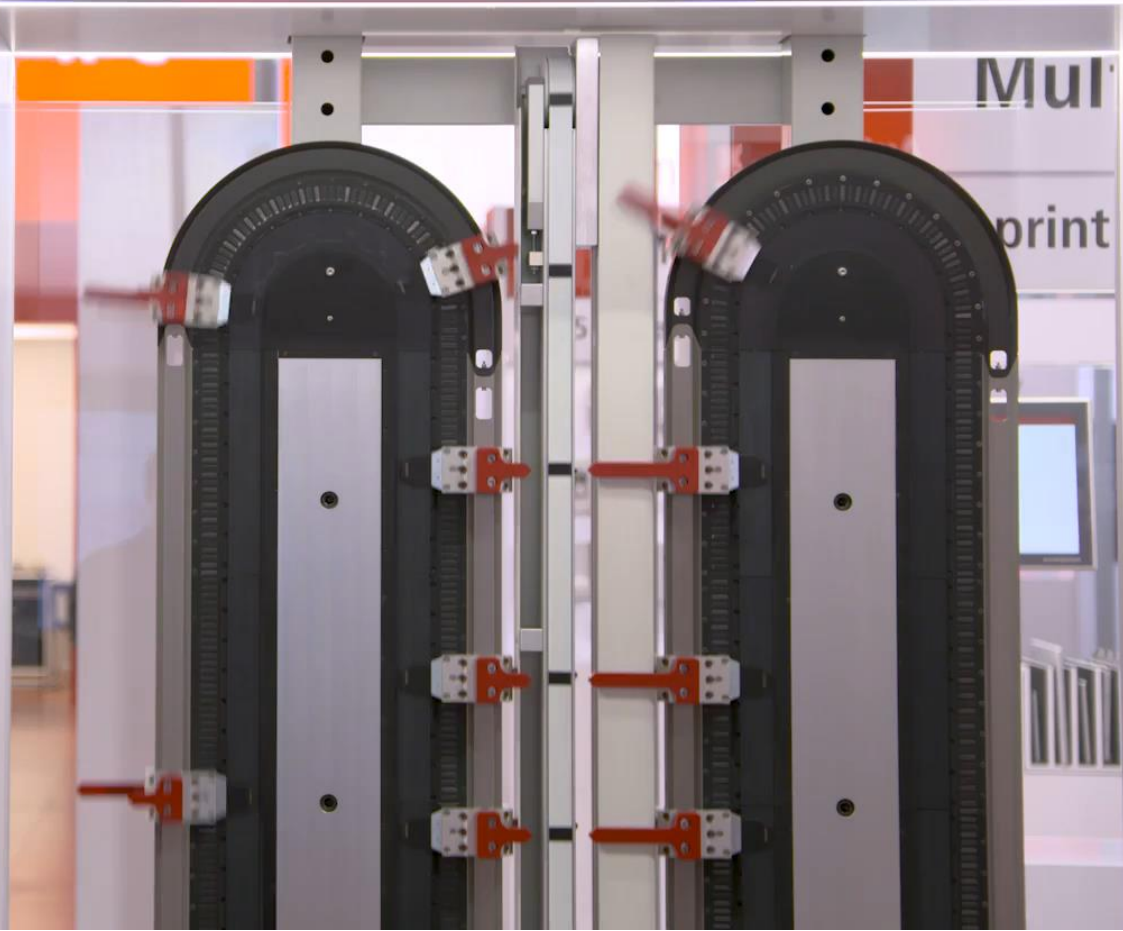
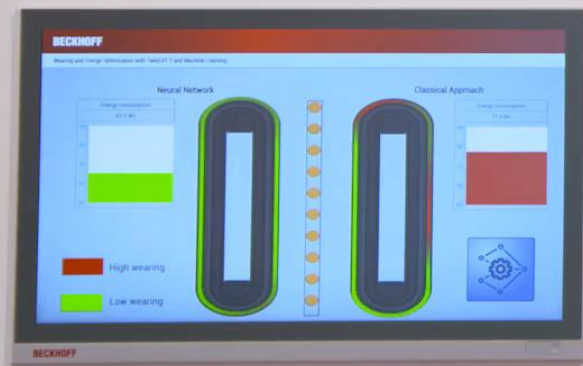


Automation

# TwinCAT Machine Learning

## Optimal control

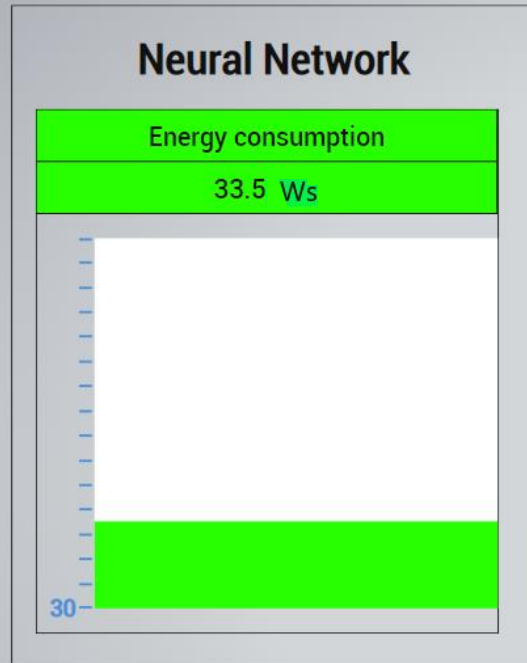
### Application



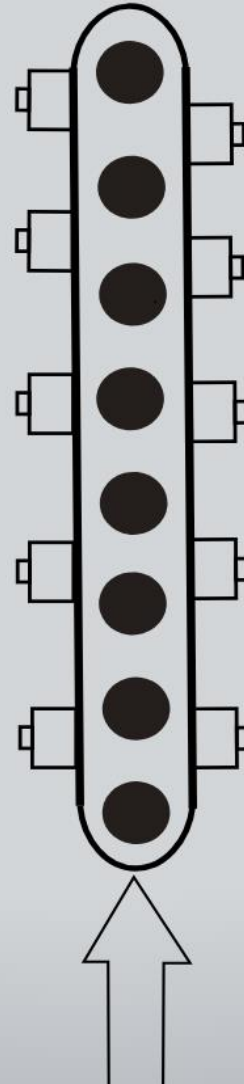
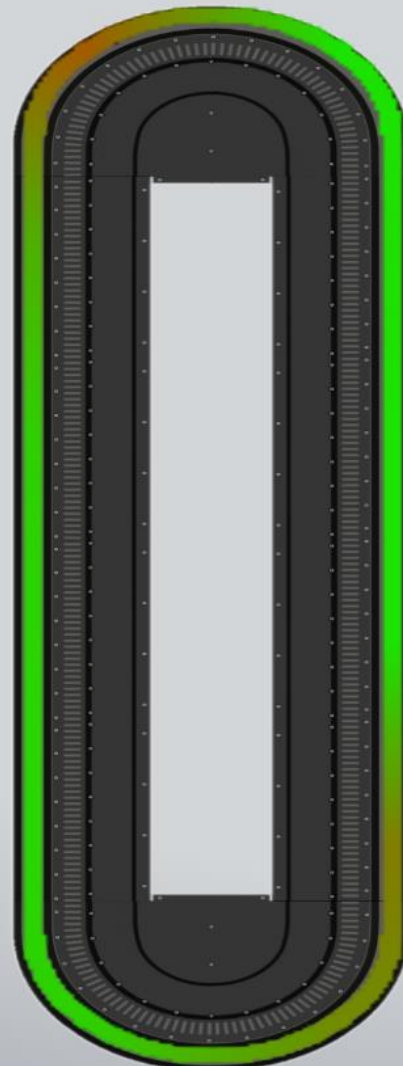


# Neural motion profile Results

BECKHOFF



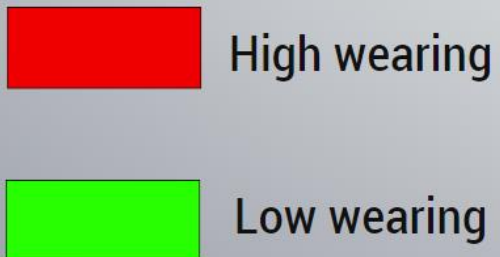
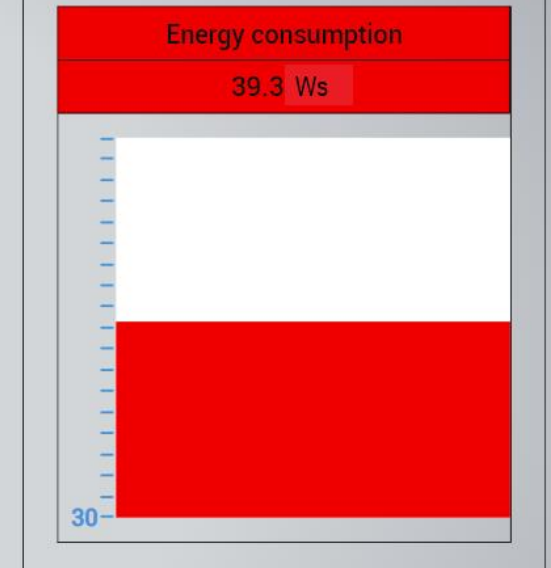
Neural Network



Classical Approach



Classical Approach





# BECKHOFF

Vielen Dank!

Kontakt: [f.bause@beckhoff.com](mailto:f.bause@beckhoff.com)

